

## Экспериментальные исследования бестабличного метода угловых засечек для контроля строительства дорожных закруглений

П.В. Тихомиров<sup>a</sup>, В.Э. Меерсон<sup>b</sup>, О.Л. Картавцев<sup>c</sup>, А.А. Скрыпников<sup>d</sup>, А.Б. Бондарев<sup>e</sup>

Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия,

<sup>a</sup> mail@bgitu.ru, <sup>b</sup> meerson@yandex.ru, <sup>c</sup> kartol\_19@yandex.ru, <sup>d</sup> aleksei-skrypnikov@mail.ru, <sup>e</sup> abbond89@yandex.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1146-5316>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4724-6489>

Статья поступила 24.08.2022, принята 02.09.2022

*Описан эксперимент по проведению дисперсионного анализа точности разбивки и контроля закруглений бестабличным методом угловых засечек в зависимости от трех факторов —  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  (погрешности откладывания углов засечек, радиуса и угла поворота кривой), а также корреляционный анализ результатов измерений с установлением уравнения регрессии для указанных факторов. Производилось по 16 измерений каждой отложенной линии. Результаты измерений осреднялись, и линии корректировались. Два цикла измерений были выполнены разными теодолитами, т. е. варьировался фактор  $m_\varepsilon$ . Наблюдения были проведены для различных радиусов  $R$ . Углы  $\varphi$  изменялись в процессе эксперимента. Проведены трехфакторный дисперсионный анализ результатов наблюдений и вычисление общей девиаты. В результате дисперсионного анализа на основе полученных данных сделаны выводы: факторы  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  существенно влияют на точность разбивки и контроля. Существенно также и совместное влияние факторов  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$ . Только совместное влияние факторов попарно —  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ;  $m_\varepsilon$ ,  $\varphi$  или  $R$ ,  $\varphi$  — носит случайный характер. Результаты проведенных исследований для всех состояний системы совершенствования геометрического контроля строительства дорожных закруглений позволили установить, что при разбивке и контроле строительства дорожных кривых примененной кривизны необходимо принимать разбивочные интервалы неодинаковыми по длине, обратно пропорциональными кривизне участка. Получены зависимости для определения величины расстояния видимости методом наземной стереофотограмметрии применительно к горизонтальным кривым в плане дороги; выполнена оценка точности определения расстояния видимости по материалам наземной стереофотограмметрии; в случае отсутствия видимости на горизонтальных кривых автомобильных дорог предложены зависимости для определения площади и объема срезки, а также установлены зависимости для оценки точности выполненных измерений  $m_{v_{cp}}$  и  $m_{s_{cp}}$  срезки.*

**Ключевые слова:** трехфакторный дисперсионный анализ; корреляционный анализ; бестабличный метод угловых засечек; вычисление общей девиаты; геометрический контроль строительства дорожных закруглений; величина расстояния видимости.

## Experimental studies of the tableless method of corner serifs for controlling the construction of road curves

P.V. Tikhomirov<sup>a</sup>, V.E. Meerson<sup>b</sup>, O.L. Kartavtsev<sup>c</sup>, A.A. Skrypnikov<sup>d</sup>, A.B. Bondarev<sup>e</sup>

Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolution Ave., Voronezh, Russia

<sup>a</sup> mail@bgitu.ru, <sup>b</sup> meerson@yandex.ru, <sup>c</sup> kartol\_19@yandex.ru, <sup>d</sup> aleksei-skrypnikov@mail.ru, <sup>e</sup> abbond89@yandex.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4708-0645>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1146-5316>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4787-6371>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6587-3406>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4724-6489>

Received 24.08.2022, accepted 02.09.2022

*The article describes an experiment on conducting analysis of variance on the accuracy of a layout and control of road curves using the non-table method of corner serifs depending on three factors  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  (errors in laying the corners of the serifs, radius and angle of rotation of the curve), as well as a correlation analysis of the measurement results with the establishment of the equation regressions for the indicated factors. 16 measurements are made for each plotted line. The measurement results are averaged and the lines are corrected. Two cycles of measurements are performed by different theodolites, that is, the factor  $m_\varepsilon$  varied. Observations are made for various radii  $R$ . The angles  $\varphi$  changed during the experiment. A three-factor analysis of variance of the results of observations is carried out, the calculation of the total deviate is performed. As a result of the analysis of variance, based on the data obtained, the following conclusions are drawn: the factors  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  significantly affect the accuracy of breakdown and control. The joint influence of the factors  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  is also significant. Only the joint influence of factors in pairs  $m_\varepsilon$ ,  $R$  or  $m_\varepsilon$ ,  $\varphi$  or  $R$ ,  $\varphi$  is random. The results of the studies for all states of the system for improving the geometric control of the construction of road curves make it possible to establish that when staking and controlling the construction of road curves of the applied curvature, it is necessary to take the staking intervals unequal in length, inversely proportional to the curvature of the section. Dependences for determining the magnitude of the visibility distance by the method of ground-based stereophotogrammetry, as applied to horizontal curves in the road plan, are obtained; an assessment of the accuracy of determining the visibility distance based on ground-based stereophotogrammetry is performed; in the case of lack of visibility on the horizontal curves of highways, dependences are proposed to determine the area and volume of the cutoff, and dependencies are established to assess the accuracy of the performed measurements  $m_{v_{cp}}$  and  $m_{s_{cp}}$  of the cutoff.*

**Keywords:** three-way analysis of variance; correlation analysis; non-table method of corner marks; calculation of the total deviate; geometric control of the construction of road curves; visibility distance.

**Введение.** Целью эксперимента являются трехфакторный дисперсионный анализ точности разбивки и контроля закруглений бестабличным методом угловых засечек в зависимости от трех факторов  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  (погрешности откладывания углов засечек, радиуса и угла поворота кривой), а также корреляционный анализ результатов измерений с установлением уравнения регрессии для указанных факторов.

**Экспериментальные исследования бестабличного метода угловых засечек.** Для максимальной чистоты эксперимента была выбрана открытая равнинная местность со спокойным, очень слабо выраженным рельефом. Из одной точки  $O$  — центра кривой электронным тахеометром откладывались методом приближений и редукиций две одинаковой длины линии под углом  $\varphi$  друг к другу. Производилось по 16 измерений каждой отложенной линии. Результаты измерений осреднялись, и линии корректировались. При этом точность отложенных линий  $m_R$  доведена до  $\pm 3$  м.м. Угол  $\varphi$  откладывался двумя приемами с точностью  $\pm 1''$ . Таким образом были закреплены на специально изготовленных металлических планшетах (0,4x0,4 м) с приваренными ножками-кольями, вбитыми в грунт, наподобие столиков, возвышающихся над поверхностью земли на 5–10 см. Таким образом точность центрирования и редукиции была доведена до 1 мм. Затем двумя теодолитами из двух точек НК и КК откладывались: одним теодолитом от хорды  $S$  углы  $\beta_i$ , и другим теодолитом — от направления на центр кривой  $O$  углы  $(90^\circ - \beta_i)$ . На пересечениях коллимационных плоскостей теодолитов засекались и фиксировались указанным способом различные точки кривой. Каждая точка после фиксации контролировалась из центра кривой  $O$  с девятикратным измерением расстояния и осреднением результата  $R_i$ . Поскольку была достигнута высокая точность центрировки и редукиции, а также измерения расстояния, соответствующими погрешностями и погрешностями взаимного расположения точек НК и КК и  $O$  можно пренебречь. Тогда за истинную погрешность положения каждой точки кривой можно принять  $\mu_3 = R_i - R$ . В процессе эксперимента изменялись условия измерений по трем факторам. Два цикла измерений были выполнены разными теодолитами, т. е. варьировался фактор  $m_\varepsilon$  (10 и 30). Наблюдения были проведены для различных радиусов  $R$  (200, 400 и 600 м). Углы  $\varphi$  изменялись в процессе эксперимента ( $20^\circ$ ,  $40^\circ$  и  $80^\circ$ ).

Проведен трехфакторный дисперсионный анализ результатов наблюдений, вычисление общей девиаты.

В результате дисперсионного анализа на основе полученных данных сделаны выводы: факторы  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$  существенно влияют на точность разбивки и контроля. Существенно также и совместное влияние факторов  $m_\varepsilon$ ,  $R$ ,  $\varphi$ . Только совместное влияние факторов попарно —  $m_\varepsilon$ ,  $R$  или  $m_\varepsilon$ ,  $\varphi$  или  $R$ ,  $\varphi$  носит случайный характер. Чтобы в численном виде найти закономерность влияния указанных факторов, необходим корреляционный анализ, чтобы вывести уравнение регрессии, т. е. уравнение стохастической связи между указанными

факторами. Для этого сначала зависимость должна быть проверена аналитически.

Величины  $P$  и  $t$  будут равны:

$$P = R \sin \varphi / 2, \quad (1)$$

$$t = R \cos \varphi / 2. \quad (2)$$

Определяем  $R$  и дифференцируем:

$$R = Pt \operatorname{tg} \beta + t; \quad dR = \frac{P}{\cos^2 \beta} d\beta. \quad (3)$$

Подставляя вместо  $P$  его значение для точки СК, получим:

$$dR = \frac{R \sin \varphi / 2}{\cos^2 \varphi / 2} d\beta = 2R t \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4} d\beta. \quad (4)$$

Переходим к погрешностям:

$$\mu_3 = 2R t \operatorname{tg} \frac{\varphi}{4} \cdot \frac{m_\varepsilon}{\rho''}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что мы получили зависимость между исследуемыми факторами, аналогичную выведенной ранее графоаналитическим методом. Эту зависимость можно представить в виде:

$$\mu_3 = a + b m_\varepsilon'' \cdot \varphi^0 \cdot R, \quad (6)$$

где  $a$  — поправочный параметр (мм)  $\mu_3$  (мм),  $R$  (км),

$$b = \frac{500000}{\rho^0 \rho''} = 0.0423. \quad (7)$$

Параметры  $a$  и  $b$  теоретически найденной формы связи (2.30), необходимо найти эмпирическим путем в результате обработки экспериментальных данных. Вычисление корреляционной связи производилось по методике вычисления корреляционной связи (по усредненным значениям  $\mu$ ):

$$\mu = a + b m R \varphi; \quad \bar{a} + \bar{b} m_i R_i \cdot \varphi_i - \mu_i = V_i; \quad (8)$$

$$n a + [m_i R_i \varphi_i] a + [(m_i R_i \varphi_i)^2] b - [m_i R_i \varphi_i \mu_i] = 0. \quad (9)$$

Решение нормальных уравнений по способу Г. Крамера:

$$D = n[x^2] - [x]^2 = 24 \cdot 4788000 - (7280)^2 = 61913600$$

$$a = \frac{[x^2][y] - [x][xy]}{D} = \frac{1527372000 - 1502446400}{61913600} = 0,402586$$

$$b = \frac{n[xy] - [x][y]}{D} = \frac{4953120 - 2322320}{61913600} = 0,042491$$

$$\mu = 0.4 + 0.0425 \cdot m R \varphi = 0.4 \text{ мм} + \frac{502000}{\rho^0 \rho''} m'' \varphi^0 R$$

Веса этих параметров:

$$P_a = \frac{D}{[x^2]} = \frac{61913600}{4788000} = 12,93099; \quad P_b = \frac{D}{n} = \frac{61913600}{24} = 257973$$

$$\overline{mR \varphi} = \frac{7280}{24} = 303; \quad \bar{\mu} = 13; \quad m_{(mR \varphi)}^2 = \frac{2579736}{24} = 107489; \quad m_{(mR \varphi)} = 328;$$

$$m_{(\mu)}^2 = 194,375; m_{(\mu)} = 14; \bar{\mu}_{mR\varphi} \mu = \frac{109619}{24} = 4567;$$

$$m_{(mR\varphi)} \cdot m_{(\mu)} = 4592; r = \frac{4567}{4592} = 0.994;$$

$$[V^2] = n \cdot m^2(V) = n \cdot m_{(\mu)}^2 [1 - r^2] = \sum_{i=1}^n \delta_{(\mu)}^2 [1 - r^2]$$

$$= 4665 [1 - 0,994^2] = 55,8$$

$$m^2 = \frac{[V^2]}{n-2} = \frac{55,8}{22} = 2,54; m_a = \sqrt{\frac{m^2}{P_a}} = \sqrt{\frac{2,54}{12,931}} =$$

$$0,44; m_b = \sqrt{\frac{m^2}{P_b}} = 0,001$$

Уравнение регрессии будет таким: (при  $R(\kappa\mu)$ ,  $m_{\varepsilon}, \varphi^0$ ):

$$\mu_{\text{эмп}} = 0,4\text{мм} + \frac{502000}{\rho^0 \rho''} m'' \varphi^0 R = \mu(\text{мм}) = 0,4 + 0,0425mR\varphi \quad (2.96)$$

Коэффициентом  $a = 0,4$  мм можно пренебречь. Погрешность  $m_b = 0,001$  ничтожно мала. Коэффициент  $b = 0,0425$ , найденный эмпирическим путем, близок по значению к теоретическому коэффициенту  $b = 0,0423$ , исходя из (7). Например: при  $m_{\varepsilon} = 30''$ ,  $R = 0.4$  км,  $\varphi = 60^0$ ,  $\mu_{\text{зтеор}} = 31,2$  мм,  $\mu_{\text{зэмп}} = 31,0$  мм.

При  $m_{\varepsilon} = 10''$   $R = 0,8$  км,  $\varphi = 30^0$ ,  $\mu_{\text{зтеор}} = 10,2$  мм,  $\mu_{\text{зэмп}} = 10,6$  мм.

Итак, исходя из результатов дисперсионного и корреляционного анализа их точности, можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований, подтвержденной критерием В.И. Романовского.

В практическом применении разбивку и контроль строительства закруглений бестабильным методом угловых засечек производят без предварительных вычислений и использования таблиц следующим образом. Откладывают одновременно одинаковые углы  $\beta_i$  двумя теодолитами: одним от тангенса  $T$ , другим — от хорды  $C$ :  $\beta_i = 2^0 \cdot i$  для радиусов  $R < 100$  м;  $\beta_i = 1^0 \cdot i$  для  $R = 100-300$  м;  $\beta_i = 5^0 \cdot i$  для  $R = 400-1200$  м, и на пересечениях визирных осей теодолитов фиксируют точки кривой.

Результаты проведенных исследований для всех состояний системы совершенствования геометрического

контроля строительства дорожных закруглений позволили установить, что при разбивке и контроле строительства дорожных кривых примененной кривизны необходимо принимать разбивочные интервалы не одинаковыми по длине, обратно пропорциональными кривизне участка. Это позволяет сократить количество разбивочных знаков, измерений и построений и в то же время повысить эффективность и качество разбивочно-контрольных и дорожно-строительных работ. Разработанный для первого состояния системы SK1 бестабильный метод прямых угловых засечек позволяет восстанавливать оперативно в процессе строительства закруглений разбивочные знаки без дополнительных закреплений, предварительных вычислений, таблиц и линейных измерений, что обеспечивает непрерывность контроля поточного строительства, улучшает динамические и эстетические характеристики построенных лесовозных автомобильных дорог. Этим же целям служит разработанный для второго состояния системы SK2 метод створных нормалей, позволяющий разбивать и контролировать одновременно ось кривой и нормали к кривой постоянной и переменной кривизны.

**Заключение.** В результате проведенных исследований по определению видимости на горизонтальных кривых в плане лесовозной автомобильной дороги можно сделать следующие выводы: получены зависимости для определения величины расстояния видимости методом наземной стереофотограмметрии применительно к горизонтальным кривым в плане дороги; выполнена оценка точности определения расстояния видимости по материалам наземной стереофотограмметрии; в случае отсутствия видимости на горизонтальных кривых автомобильных дорог предложены зависимости для определения площади и объема срезки, а также установлены зависимости для оценки точности выполненных измерений  $m_{\text{ср}}$  и  $m_{\text{вср}}$  срезки.

Трехфакторный дисперсионный анализ точности разработанных методов на основе экспериментальных исследований, проведенных авторами, подтвердил теоретические выводы и соответствие точности разбивки требованиям и геометрической точности строящихся лесовозных автомобильных дорог.

#### Литература

1. Бурмистров Д.В., Высоцкая И.А., Денисенко В.В., Брюховецкий А.Н., Никитин В.В. Алгоритм моделирования процессов организации и планирования ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практической конф. (24-25 нояб. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 295-298.
2. Могутнов Р.В., Букреев В.Ю., Тихомиров П.В., Слюсарев А.А., Брюховецкий А.Н. Алгоритм формирования технического задания на проектирование машины // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве: материалы нац. науч.-практической конф. (25 сент. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 52-58.
3. Логойда В.С., Тихомиров П.В., Никитин В.В., Букреев В.Ю., Саблин С.Ю. Анализ точности индивидуального прогнозирования // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (12-13 нояб. 2019 г.). Воронеж, 2019. С. 330-335.
4. Афоничев Д.Н., Курьянов В.К., Скрыпников А.В. Принципы оптимизации проектных решений автомобильных дорог с использованием программ моделирования дорожного движения // Математическое моделирование информационных и технологических систем: сб. ст. Воронеж, 2002. С. 108-110.
5. Белокуров В.П. Транспортная психология. Воронеж, 2016. 329 с.
6. Скрыпников А.В. Количественная оценка влияния характеристик компонентов ландшафта на сложность строительства лесовозных автомобильных дорог // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. Воронеж, 2020. С. 244-251.
7. Скрыпников А.В. Выбор критерия принятия решений при управлении информационным обеспечением автомобиль-

ного транспорта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 10. С. 476-478.

8. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. 659 (1).
9. Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural models of road landscapes and microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012116.
10. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.

#### References

1. Burmistrov D.V., Vysockaya I.A., Denisenko V.V., Bryuhoveckij A.N., Nikitin V.V. Algorithm for modeling the processes of organizing and planning the rhythmic construction of logging roads // Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ih resheniya: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (24-25 noyab. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 295-298.
2. Mogutnov R.V., Bukreev V.YU., Tihomirov P.V., Slyusarev A.A., Bryuhoveckij A.N. Algorithm for the formation of technical specifications for the design of the machine // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov v sel'sko-hozyajstvennom proizvodstve: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (25 sent. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 52-58.
3. Logojda V.S., Tihomirov P.V., Nikitin V.V., Bukreev V.YU., Sablin S.YU. Analysis of the accuracy of individual forecasting // Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya

APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (12-13 noyab. 2019 g.). Voronezh, 2019. P. 330-335.

4. Afonichev D.N., Kur'yanov V.K., Skrypnikov A.V. Principles of optimizing design solutions for highways using traffic simulation programs // Matematicheskoe modelirovanie informacionnyh i tekhnologicheskikh sistem: sb. st. Voronezh, 2002. P. 108-110.
5. Belokurov V.P. Transport psychology. Voronezh, 2016. 329 p.
6. Skrypnikov A.V. Quantitative assessment of the influence of the characteristics of landscape components on the complexity of the construction of logging roads // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovaniy dlya effektivnogo razvitiya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. Voronezh, 2020. P. 244-251.
7. Skrypnikov A.V. The choice of decision-making criteria in the management of information support for automobile transport // Automation and modern technology. 2017. V. 71. № 10. P. 476-478.
8. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical background of road landscape zoning. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 659 (1).
9. Zelikov V.A., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Tikhomirov P.V., Borovlev A.O. Structural models of road landscapes and microlandscapes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012116.
10. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tikhomirov P.V. Studying a geographical environment for road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2021. № 1 (49). P. 66-78.